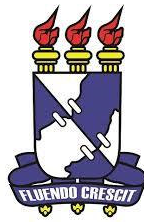


UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
Departamento de Física



Trabalho de Conclusão de Curso – Monografia

***Limitando a Opacidade Cósmica Com Supernovas Tipo Ia e a Taxa de
Expansão Cósmica $H(z)$ Em Diversos Redshifts***

Professor: Javier Ernesto Gonzalez Sanchez

Aluno: José Santos Sobral, Matrícula: 201420042664

07/12/2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Ata da apresentação da monografia de
graduação do aluno José Santos Sobral.

Aos dezenove dias do mês de dezembro do ano dois mil e dezoito, às dez horas, na sala de reuniões do DFI, realizou-se em sessão pública perante a Banca Examinadora constituída pelos docentes pesquisadores Prof. Dr. Javier Ernesto Gonzalez Sanchez (Presidente), Prof. Dr. Mário Everaldo de Souza e o Prof. Dr. Sergio Scarano Jr, a apresentação da monografia de Bacharelado em Física: Astrofísica do aluno José Santos Sobral, intitulada LIMITANDO A OPACIDADE CÓSMICA COM SUPERNOVAS TIPO IA E A TAXA DE EXPANSÃO CÓSMICA $H(z)$ EM DIVERSOS REDSHIFTS. Aberta a sessão, o Senhor Presidente explicou a sistemática de defesa, observando que o autor da monografia dispunha de até 30 (trinta) minutos para apresentação da monografia e a seguir cada membro da banca teria um máximo de 10 (dez) minutos para arguição, sendo igual tempo para a defesa por parte do aluno. Realizada a apresentação da monografia pelo autor, que durou 30 minutos, o senhor presidente passou a palavra para o Prof. Dr. Mário Everaldo de Souza que arguiu o aluno durante 10 minutos. Em seguida o mesmo fez o Prof. Dr. Sergio Scarano Jr, que arguiu o autor durante 10 minutos, e finalmente o Senhor Presidente completou o período arguindo o aluno também durante 10 minutos. Após a defesa do aluno, o Senhor Presidente reuniu a Comissão para efetivar o julgamento com a atribuição das notas. A média final das notas atribuídas por cada membro foi então 6,5 (seis e meio). Com tal média final, a monografia foi declarada APROVADA. Para registro, lavrou-se a presente ata que será assinada pelos membros da Banca Examinadora. Cidade Universitária "Prof. José Aloísio de Campos", 19 de dezembro de 2018.

Prof. Dr. Javier Ernesto Gonzalez Sanchez
(Departamento de Física da UFS)

Prof. Dr. Mário Everaldo de Souza
(Departamento de Física da UFS)

Prof. Dr. Sergio Scarano Jr
(Departamento de Física da UFS)

José Santos Sobral
(Discente)

Limitando a Opacidade Cósmica Com Supernovas Tipo Ia e a Taxa de Expansão Cósmica $H(z)$ Em Diversos Redshifts

José Santos Sobral^{1*}

¹ Departamento de Física da UFS, jssobralneto@hotmail.com

Resumo: A descoberta de que o Universo está em expansão acelerada, projetou a Astronomia para a investigação da energia escura. Essa verificação foi possível, primeiramente, pelo estudo do brilho aparente das supernovas do tipo Ia (SNe Ia) através de dois grupos independentes de pesquisadores, cerca de duas décadas atrás. O brilho observado era mais fraco que o esperado em um Universo desacelerado. A hipótese básica por trás desta descoberta é que o Universo é transparente, porém, existem fontes de opacidade que afetam o brilho observado das SNe Ia e que podem imitar o comportamento da energia escura. Atualmente, a aceleração é confirmada por experimentos independentes, entretanto, ainda é importante testar a hipótese da transparência cósmica, pois caso ela não tenha sido corrigida corretamente nos dados de SNe Ia, estimativas de parâmetros cosmológicos via estas observações estarão comprometidos. Neste trabalho de conclusão de curso, foi revisado um método independente de modelo cosmológico que testa a hipótese básica de transparência utilizando dados da taxa de expansão do Universo (que independem de presença de opacidade) e SNe Ia, através do trabalho realizado pelos autores Holanda, R. F. L., Carvalho, J. C., Alcaniz, J. S. Como veremos, foi obtido que um Universo transparente é compatível com os dados com alta confiança estatística.

1. Introdução

Ao longo dos séculos, a Cosmologia vem se esforçando em explicar os resultados das observações feitas pelos astrônomos, estudando os limites estruturais do Universo observável. Com a formulação da Teoria da Relatividade Geral (TRG), em 1915, por Albert Einstein [1], deu-se início à Cosmologia Moderna no ano de 1917. A TRG descreve a gravitação como uma consequência geométrica da estrutura do espaço-tempo devido à distribuição da matéria no Universo. Essa teoria mostrou-se consistente em relação à compreensão da estrutura em larga escala do Universo, o que fez com que a teoria Newtoniana da Gravitação ganhasse um caráter muito limitado para explicar o mesmo.

Pouco tempo depois do surgimento da TRG, Einstein formulou uma hipótese na qual dizia que a matéria do Universo observável se encontrava distribuída de forma homogênea e isotrópica, tal hipótese era denominada de Princípio Cosmológico, com o objetivo de ser uma simplificação ao se estudar a dinâmica do Universo de forma matematicamente acessível. A fim de obter um Universo estático e compatível com o que era conhecido na época, Einstein adicionou o termo conhecido como constante cosmológica Λ . Essa constante, cujo caráter é repulsivo, seria necessária para contrabalancear a atração gravitacional da matéria [2]. Ainda nessa mesma época, apresentava-se outro modelo cosmológico a fim de se opor ao modelo de Einstein, o chamado modelo de W. de Sitter, criado pelo astrônomo holandês Willem de Sitter, consistindo-se de um modelo

cosmológico estacionário, situado num espaço plano, removendo toda a matéria do Universo [3]. Nesse modelo, as taxas de expansão e desaceleração do Universo são constantes. Posteriormente, A. Friedmann e G. Lemaître obtiveram soluções não estacionárias para as equações de campo da Relatividade Geral. Porém com o estado rudimentar das observações astronômicas da época para objetos muito distantes, essa concepção de Universo dinâmico não era observacionalmente acessível.

Já em 1923, Edwin Hubble, utilizando um telescópio de 2,5 m de diâmetro, concluiu que a nossa galáxia não era a única do Universo, ao medir distâncias de estrelas individuais da nebulosa de Andrômeda. Em seguida, analisando dados de *redshift* obtidos por Slipher e outros por ele mesmo, concluiu que as galáxias se afastavam com velocidades cada vez maiores, proporcionalmente às suas distâncias da Via Láctea, resultado esse que tinha sido previsto dois anos antes por George Lemaître, descartando o modelo estático de Einstein. Mais tarde, Einstein, juntamente com de Sitter, obtiveram uma solução expansionista, sem a constante cosmológica, desconsiderando-a das suas equações de campo, conhecido como modelo Einstein-de Sitter, modelo plano e dominado por matéria.

Desconsiderando-se a constante cosmológica, os modelos cosmológicos se dividem em três classes, dependentes de um parâmetro de curvatura k . No caso: $k = 1$, a densidade da matéria é maior do que a necessária para reverter a expansão, denominada de densidade crítica, com isso o Universo tem seção espacial fechada [4]. Para o

caso: $k = -1$, o Universo tem seção espacial aberta, ou seja, a densidade de matéria é menor que a crítica, com isso ele se expandirá para sempre [5]. Quanto ao caso $k = 0$, chamado Universo plano, a densidade crítica do Universo tende a se expandir para sempre com uma velocidade menor que a do caso $k = -1$. Esses modelos dependentes de k construíram os modelos cosmológicos mais estudados até a década de 90.

Essa ideia de um Universo em evolução veio a ser reforçada com a evidência observacional da expansão cósmica descoberta por Lemaître, em 1927 [6], juntamente com seu colaborador Milton Humason, esse pilar observacional possibilitou o surgimento da então chamada teoria do *big bang*. De acordo com ela, o Universo emergiu de um estado primordial denso e quente. Após alguns segundos, O Universo esfriou-se suficientemente para a formação de certos núcleos atômicos. A teoria prevê que núcleos de elementos leves, tais como Hidrogênio, Hélio e Lítio, teriam sido produzidos nos primeiros segundos do Big Bang à temperaturas altíssimas [7], processo esse que ficou conhecido como nucleossíntese primordial.

Outro grande pilar observacional foi a descoberta da radiação cósmica de fundo em Microondas (CMB), com temperatura média, atualmente, de 2,75 K, sendo uma radiação de corpo negro e de natureza isotrópica, prevista inicialmente por Alpher, Herman e Gamow através de seu estudo da nucleossíntese primordial [7] e descoberta acidentalmente por A. Penzias e Robert W. Wilson [8], em 1965. Essa radiação foi emitida cerca de 380.000 anos depois do Big Bang, após o seu esfriamento para formar átomos neutros.

Em 1998, dois grupos diferentes de astrônomos [9] chegaram à conclusão inesperada de uma expansão acelerada. A causa disso foi sugerida como sendo uma forma de energia desconhecida do Universo, de pressão negativa e repulsiva, denominada energia escura.

Além dos estudos de SNe Ia, outros também indicavam resultados importantes para a Cosmologia Moderna, como a existência de flutuações na CMB, indicando que a densidade total de matéria-energia é aproximadamente igual a densidade crítica, ou seja, o Universo está muito próximo de ser especialmente plano ($k = 0$).

Considerando que a existência da componente de energia escura é indispensável, modificando a visão tradicional do Universo, a inexistência de um candidato que seja convincente o bastante para substituir a Energia Escura, principalmente oriundo da física de partículas, tem gerado

inúmeros debates e especulações teóricas. Existem vários, como por exemplo: I) A constante cosmológica Λ , interpretada como resultado das contribuições das densidades de energia do vácuo associado com os campos quânticos; II) Densidade de energia do vácuo decaindo com o tempo $\Lambda(t)$ [10, 11, 12]; III) Fluido de Matéria – Energia, caracterizado pela equação de estado $p = \omega x \rho$, $1 \leq \omega x \leq 0$ [13,14]; IV) Um gás tipo Chaplygin cuja equação de estado é dada por $p = -\frac{A}{\rho^\alpha}$, onde A é uma constante positiva e $0 \leq \alpha \leq 1$ [15]-[18] ; V) Fluido de Matéria – Energia com equação de estado dinâmica, onde $\omega = \omega(z)$, etc.

Entretanto, o espaço-tempo na Cosmologia Moderna é regido pela métrica homogênea e isotrópica de Friedmann [19]- Lemaître [20]-Robertson [21] – Walker [22] (FLRW), onde a obtenção da distância de luminosidade nesta métrica tem como hipótese básica a conservação do número de fótons ou, em outras palavras, a transparência cósmica. Assim, é importante enfatizar que existe um efeito de escurecimento nas observações de SNe Ia conhecido por **Opacidade Cósmica** que pode levar a estimativas incorretas dos parâmetros cosmológicos. Existem também alguns mecanismos alternativos para investigar a causa dessa diminuição de brilho das SNe Ia, exemplos: Efeitos evolucionários nos eventos desse tipo de SNe Ia [23,24], gravidade modificada [25,26,27], bolha local de Hubble [28,29], existência de axions [30,31], fontes de atenuação de luz [32,33] e outros tipos de natureza exótica que leva a essa diminuição ou até mesmo a certos casos de aumento de brilho dessas SNe Ia.

O parâmetro de opacidade cósmica relaciona a quantidade de fótons emitidos pela fonte e a que chega ao observador. Com o intuito de testar esse parâmetro, diversos autores têm recorrido à Relação de Dualidade de Distâncias Cósmicas (RDDC), que é uma consequência do Teorema da Reciprocidade de Etherington [34] e independe de modelo cosmológico e também da TRG, válida num Universo transparente e onde a gravidade é uma teoria métrica, sendo: $DL(z) = (1+z)^2 DA(z)$, em que DL é a distância de luminosidade, DA é a distância de diâmetro angular e o *redshift* z . O objetivo da análise apresentada neste trabalho é confrontar distâncias de diâmetro angular independentes da conservação do número de fótons com distâncias de luminosidade, que são dependentes.

Como discutido anteriormente, em 1998, os dados de SNe Ia indicaram a aceleração cósmica e,

consequentemente a presença de uma componente exótica: a **Energia Escura**. Porém, as observações das SNe Ia são afetadas por pelo menos 4 fontes de opacidades: a nossa galáxia 'Via Láctea', a interação da SNe Ia com a sua galáxia hospedeira, as galáxias intermediárias, a interação com o meio intergaláctico e outros cenários de Física exótica [35].

Essa monografia tem como objetivo expor um recente limite sobre a opacidade cósmica, obtido de forma independente de modelo cosmológico, em que foram utilizados dados de SNe Ia e $H(z)$. O objetivo principal é buscar a comparação das observações que dependam de uma provável transparência cósmica nos testes atuais, como SNe Ia, com dados que não dependam dessa hipótese, como os dados da taxa da expansão cósmica $H(z)$ em diferentes *redshifts*. Tais dados são obtidos através de estimativas de idades de galáxias velhas avermelhadas e que dependem apenas dos seus espectros e não das suas luminosidades.

Este trabalho está dividido como segue: na Seção 2, será apresentado o cenário da Cosmologia Padrão, na qual será feita uma breve abordagem do Princípio Cosmológico, como também da Teoria da Relatividade Geral, métrica de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker e as equações de Friedmann. Ainda nessa seção também será apresentada a distância de luminosidade em função do *redshift* $D_L(z)$, distância de diâmetro angular $D_A(z)$ e uma abordagem introdutória sobre a opacidade cósmica conectada à aceleração do universo, utilizando SNe Ia. Na Seção 3, será apresentada toda a metodologia utilizada para esse estudo, Na Seção 4, seus Resultados e Discussões, Na seção 5, as Conclusões e Na Seção 6, a Bibliografia.

2. Cosmologia Padrão

2.1. Princípio Cosmológico:

A crença de que o lugar que nós ocupamos no Universo não ser um lugar especial, geralmente no centro, compôs o Princípio Copernicano. Essa interpretação, a propósito, inspirou o surgimento do Princípio Cosmológico.

Tal Princípio afirma que visto de uma escala suficientemente grande, as propriedades do Universo são as mesmas para todos os observadores, havendo então uma homogeneidade e isotropia em certa escala [36,37].

O Princípio Cosmológico impõe certas restrições matemáticas sobre a geometria permissível do

espaço-tempo e todo arcabouço teórico-matemático que sustenta esse princípio tem implicação na Teoria da Relatividade Geral, na qual veremos na subseção seguinte.

2.2. Teoria da Relatividade Geral (TRG):

As equações de campo de Einstein são conhecidas como as equações básicas do campo gravitacional da TRG, sendo elas [38]:

$$G_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R - \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}. \quad (2.1)$$

onde $G_{\mu\nu}$ é o tensor de Einstein, $T_{\mu\nu}$ é o tensor de curvatura de Ricci, $R_{\mu\nu}$ é o tensor de Ricci, R é o escalar de curvatura de Ricci, G a constante gravitacional, Λ é a constante cosmológica e $\frac{8\pi G}{c^4}$ é a constante de Einstein.

2.3. Métrica de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW):

A métrica mais geral que obedece ao Princípio Cosmológico é a métrica de FLRW, pois fornece a métrica mais geral, homogênea e isotrópica possível. Para considerar uma curvatura constante e usando uma simetria esférica (não-euclideana), essa métrica pode ser mostrada como sendo [39]:

$$ds_3^2 = \frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \quad (2.2)$$

Acrescentando-se a dimensão temporal t , e incorporando a métrica para o espaço-tempo, a geometria do Universo pode ser definida na forma de um único elemento de linha 4-dimensional:

$$ds^2 = (cdt)^2 - a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \right], \quad (2.3)$$

onde r, θ e ϕ são coordenadas esféricas, em que r é uma coordenada comóvel medida a partir de uma geodésica (é definida como uma curva cujos vetores tangentes permanecem paralelos se forem transportados ao longo dele); $a(t)$ é um fator de escala; t é o tempo cosmológico, medido por observadores comóveis e k é o parâmetro de curvatura espacial do Universo.

Essa métrica também pode ser expressa na forma matricial, representado como um elemento de linha do espaço-tempo de Riemann (3.1):

$$g_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-a^2}{1-kr^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a^2 r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a^2 r^2 \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Assim, a métrica de FLRW é diagonal, onde os elementos da diagonal principal são componentes covariantes e diferentes de zero.

2.4. Equações de Friedmann:

As equações que descrevem a expansão do Universo são as equações de Friedmann-Lemaître, derivadas da Teoria da Relatividade Geral para um espaço homogêneo e isotrópico. Utilizando-se da equação de campo de Einstein (2.1), o cálculo leva apenas à duas equações independentes.

$$\dot{a}^2 = \frac{8\pi G}{3} a^2 \rho + \frac{1}{3} a^2 c^2 \Lambda - k \quad (2.5)$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} (\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3}, \quad (2.6)$$

onde $H = \frac{\dot{a}}{a}$ é a constante de Hubble; Λ é a constante cosmológica; ρ e p são, respectivamente, as densidades e pressões da massa-energia que preenchem o Universo, ambas dependentes do tempo. A equação (2.6) é chamada de equação da aceleração.

No caso ($\Lambda = 0$) são muitas vezes chamadas simplesmente: as equações de Friedmann, elas relacionam a taxa de aumento do fator de escala com a densidade de energia total da matéria do Universo.

Essas equações possuem três incógnitas, ρ , p e a , que para resolver esse sistema, precisamos de outra equação. A pressão e a densidade de um fluido estão relacionadas por sua equação de estado. Em Cosmologia, usa-se a forma $p = \omega \rho$ [40], onde ω é um parâmetro de estado. A equação:

$$\dot{\rho} + 3 \frac{\dot{a}}{a} (\rho + p) = 0, \quad (2.7)$$

é conhecida como a equação da continuidade e expressa a conservação de energia, ela é derivada utilizando o tensor energia-momento com divergência nula. As soluções da equação (2.7) dependem da natureza das várias espécies de fluidos cosmológicos, que são relacionadas nas equações lineares de estado da forma $\frac{p}{\rho} = \omega$.

Diretamente das equações de Friedmann-Lemaître, assumindo ω constante, usando as equações (2.5), (2.6) e (2.7) a equação anterior se torna:

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{a}{a_0} \right)^{-3(1+\omega)} \quad (2.8)$$

onde ρ_0 é a densidade de energia medida hoje e a_0 é o fator de escala hoje.

2.5. Distância de Luminosidade d_L :

A luminosidade absoluta L é a quantidade de energia radiativa emitida por segundo. Quanto ao Fluxo aparente F , que atinge um observador distante da fonte luminosa, em um Universo plano e estático, é definida como a energia que atravessa cada unidade de área (A) de uma superfície imaginária de raio (d) igual à distância da fonte ao observador, estando a esfera centrada nessa fonte. O Fluxo aparente F pode ser expresso em termos de F , da forma [41]:

$$F = \frac{L}{A} = \frac{L}{4\pi d^2} \quad (2.9)$$

A expressão (2.9) precisa de modificações, pois estamos trabalhando num Universo FLRW e em expansão, consideramos grandes distâncias, ou seja, *redshifts* ($z > 0,1$). Os efeitos dessa expansão cosmológica devem ser considerados, especialmente em relação à distância, pois ela pode proporcionar informação sobre a dinâmica cósmica, em outras palavras, informação da taxa de expansão e de aceleração/desaceleração[40]. As razões pelas quais as modificações são necessárias neste caso são [40]:

- I) No momento em que a luz chega ao observador, a área (A) apropriada de uma esfera desenhada à volta da fonte luminosa ($A = 4\pi a_0^2 r_1^2$), dada pela métrica FLRW (eq. 2.3), onde r_1 é a coordenada radial comóvel do observador, visto a partir da fonte luminosa, que é igual a coordenada radial da fonte luminosa, visto a partir do observador (ver figura 1(a));
- II) Os fótons individuais que chegam ao observador possuem uma taxa menor em comparação com a que foi emitida, por um fator: $\frac{a(t)}{a_0} = \frac{1}{(1+z)}$;
- III) Os fótons individuais detectados pelo observador também possuem energia $h\nu_0$ menor do que a energia $h\nu$ com a qual eles foram emitidos, dada pelo mesmo fator, $\frac{1}{(1+z)}$.

Logo, a fórmula correta para o Fluxo aparente F , para qualquer grandeza de distância em um Universo com geometria FLRW e em expansão, é dada por:

$$F = \frac{L}{4\pi(a_0 r_1)^2(1+z)^2} \quad (2.10)$$

Quanto à distância de luminosidade d_L , mantendo-se válida a relação (2.9), ela pode ser expressa da forma:

$$d_L = \left(\frac{L}{4\pi F}\right)^{1/2} \quad (2.11)$$

Finalmente, substituindo 2.10 na equação 2.11, obtemos a seguinte expressão para d_L :

$$d_L = a_0(1+z)r_1 \quad (2.12)$$

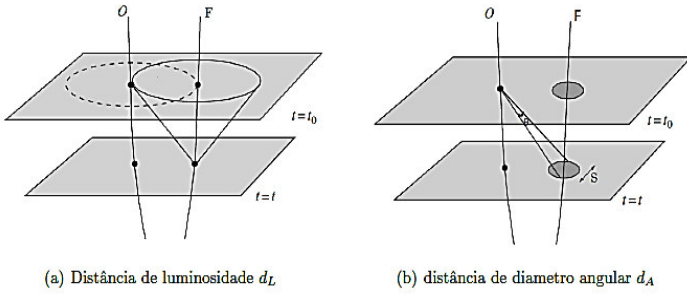


Figura 1: Geometria associada com a definição de distância de luminosidade d_L e, distância de diâmetro angular d_A , respectivamente. Com uma distância espacial suprimida (adaptada de [41]).

2.6. Distância de Diâmetro Angular d_A :

Considere uma fonte de luz F , com seu diâmetro X , a certa distância radial (d) do observador e em um espaço euclidiano. O seu diâmetro angular θ é dado por:

$$\theta = \frac{X}{d} \quad (2.13)$$

Em um Universo com geometria de FLRW e em expansão, num certo momento t em que a luz foi emitida, a distância física radial do observador a uma fonte luminosa é dada por $a(t)r_1$ (figura 1(b)). De acordo com esse Universo, a expressão para o diâmetro angular (2.13) torna-se:

$$\theta = \frac{X}{a(t)r_1} \quad (2.14)$$

A distância de diâmetro angular d_A , é definida de modo que o diâmetro angular θ , é dado pela relação usual da geometria euclidiana (2.13). Logo, expresso como, $d_A = X/\theta$, que por sua vez, comparando com a expressão (2.16), obtemos:

$$d_A = a(t)r_1 \quad (2.15)$$

A combinação de d_L com d_A nos fornece testes de uma física exótica além do Modelo Padrão ou como feito neste Trabalho e restrições sobre a opacidade cósmica. Logo então, substituindo o termo r_1 da equação (2.12) por $r_1 = \frac{d_A}{a(t)}$ da equação (2.15), em seguida utilizando o fator: $\frac{a(t)}{a_0} = \frac{1}{(1+z)}$, obtemos uma relação importante, bastante conhecida na Cosmologia, chamada Relação de Dualidade de Distância Cósmica (RDDC):

$$d_L = d_A(1+z)^2 \quad (2.16)$$

Essa última relação é válida na geometria Riemanniana, desde que o número de fótons seja conservado [42]. Usualmente, considera-se a modificação da equação (2.16) na forma [43]:

$$\frac{D_L}{D_A}(1+z)^{-2} = \eta(z) \quad (2.17)$$

onde: $\eta(z) = 1 + \eta_0 z$ ou $\eta(z) = 1 + \eta_0 \frac{z}{1+z}$, como uma forma de restringir violações quanto ao número de fótons.

Existe outro método útil para estudar a opacidade do Universo, usando velas padrão, tais como brilho de SNe Ia e *Gamma Ray Bursts* (GRBs), a fim de se detectar possíveis desvios da RDDC. Esses desvios significam que existe absorção cósmica, ou seja, o número de fótons não é conservado entre a fonte e o observador. Muitos esforços têm sido feitos para testar violações na RDDC, através de observações astronômicas [44-47]. Quando existe absorção é possível mostrar que o fluxo recebido pelo observador será reduzido por um fator $e^{-\tau(z)}$, para o caso da redução do brilho das SNe Ia, então a distância de luminosidade observada é:

$$D_{L,obs}^2 = D_{L,true}^2 e^{\tau(z)} \quad (2.18)$$

onde $\tau(z)$ é a profundidade óptica da opacidade entre um observador em $z = 0$ e a fonte em z ; $D_{L,obs}^2$ é a distância de luminosidade observada e $D_{L,true}^2$ é a distância de luminosidade real, correspondente à fonte. O Universo é transparente em $\tau(z) = 0$.

2.7. Supernovas do Tipo Ia:

As supernovas são eventos de explosão estelar, de grandes magnitudes e que ocorreram no último estágio da evolução de estrelas massivas. São classificadas de acordo com suas características inerentes, tais como a presença de diferentes linhas espectrais de emissão observados e a existência ou não de remanescentes [48]. Existem duas classes distintas de supernovas: Supernova Termonuclear, i.e. As SNe Ia, e as supernovas de núcleo colapsado, incluindo SNe IIP, IIL, IIn, IIb e IIc [49]. Uma grande característica das SNe Ia é que as distinguem das outras, como as do tipo Ib e Ic é a ausência de linhas de hidrogênio e apresentarem linhas de absorção de Silício em seu espectro.

As SNe Ia surgem a partir da fusão termonuclear de anãs brancas degeneradas binárias de Carbono-Oxigênio, quando estas atingem o limite de Chandrasekhar ($1.44 M_{\odot}$) [50,51]. Elas são utilizadas como (indicadores de distâncias) velas padronizadas na cosmologia observacional, graças à homogeneidade de suas propriedades espectrais e a magnitude absoluta máxima (M_{\max}) serem bem determinadas, são também indicadoras da geometria do Universo e do estado de expansão cósmica (acelerado ou desacelerado).



Figura 2: SN 1994D, imagem de uma SNe Ia observada de março a maio 1994 bem próximo a galáxia lenticular NGC 4526. Créditos: High-Z Supernova Search Team/HST/NASA.

As observações no brilho das SNe Ia se tornaram uma forte evidência para a aceleração cósmica [52], quando há cerca de 20 anos, dois projetos independentes, dos Estados Unidos, o *Supernova Cosmology Project do Lawrence Berkeley National Laboratory's* e o *The High-Z SN Search*,

usaram dados de *redshifts* de SNe Ia distantes e concluíram que o Universo está em expansão acelerada [53]. No contexto da (TRG), este resultado implica ou a existência de algum tipo de energia escura, constante ou variando lentamente com o espaço [44] [54], ou que o conteúdo da matéria do Universo está sujeito a processos dissipativos [55] [56].

3. Metodologia

O módulo da distância derivado das SNe Ia seria sistematicamente afetado, caso existisse uma fonte atenuadora que absorva os fótons oriundos das fontes de supernovas, comprometendo a transparência do Universo. Pois qualquer efeito que reduziria o número de fótons, consequentemente diminuiria o brilho das SNe Ia, aumentando a sua distância de luminosidade D_L .

Anteriormente vimos que $\tau(z)$ representa a opacidade entre um observador em $z = 0$ e uma fonte em z . Na presença de uma fonte de absorção de fótons, o fluxo recebido seria diminuído por um fator $e^{\tau(z)}$, em seguida a distância de luminosidade seria dada pela equação (3.20) $D_{L,obs}^2 = D_{L,true}^2 \cdot e^{\tau(z)}$. Portanto, o módulo de distância observado seria:

$$DM_{obs}(z) = DM_{true} + 2,5[\log e]\tau(z). \quad (3.1)$$

onde DM_{obs} é o módulo de distância observado e DM_{true} é o módulo de distância real (considerando o universo transparente).

DM_{obs} foi obtido através das medições de dados da amostra Supernovae Union [57]. Os autores [30] compararam esses dados com as distâncias de luminosidades independentes de opacidade, $d_{L,true}$, obtidas pelas medições de $H(z)$ [58], realizada pela análise do modelo Λ CDM plano.

Os dados de medições de $H(z)$ foram obtidos de galáxias vermelhas luminosas e antigas (LRG) que evoluíram passivamente, ou seja, sua formação estelar já se encerrou, tornando-se cada vez mais avermelhada à medida que as estrelas saem da sequência principal. Tais dados se baseiam na forma detalhada do espectro da galáxia, porém não de acordo com a luminosidade da mesma, eles não são afetados por um $\tau(z)$ não nulo, uma vez que a profundidade óptica τ depende pouco do comprimento de onda do visível.

A profundidade óptica pode ser representada em termos do número de densidade comóvel de observadores $n(z)$ em suas seções transversais $\sigma(z)$, como se segue:

$$\tau(z) = \int_0^z n(z)\sigma(z)c \frac{(1+z)^2}{H(z)} dz = \int_0^z n(z)\sigma(z) \frac{c}{H_0} \frac{(1+z)^2}{E(z)} dz \quad (3.2)$$

Particularmente, na cosmologia de FLRW, temos:

$$D_{L,true} = (1+z) \frac{c}{H_0} \frac{1}{\sqrt{\Omega_k}} S_K \left(\sqrt{\Omega_k} \int_0^z \frac{z'}{E(z')} dz' \right), \quad (3.3)$$

onde $S_K(x)$ representa $\sin(x)$ ou $\sinh(x)$, sendo dependente do parâmetro de densidade de curvatura Ω_k (que pode ser zero, positivo ou negativo) e $E(z)$ é dado por:

$$E(z) = \frac{H(z)}{H_0} = [\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_V(1+z)^{3(1+\omega)}]^{1/2}, \quad (3.4)$$

onde $H(z)$ e, portanto, $d_{L,true}$, dependem de Ω_m e H_0 , enquanto $d_{L,obs}$ e, portanto, D_{Mobs} , dependem de Ω_m , H_0 e ε , considerando um modelo Λ CDM plano.

Uma parametrização simples será usualmente considerada através de uma relação de Etherington modificada, dada por:

$$d_L = d_A(1+z)^{2+\varepsilon} \quad (3.5)$$

onde ε representa o parâmetro de afastamento da transparência ou o parâmetro de opacidade cósmica. Para o caso de um Universo perfeitamente transparente: $\varepsilon = 0$.

Os limites em ε consideram que um pequeno ε e $z \leq 1$ são equivalentes a uma parametrização óptica em $\tau(z) = 2\varepsilon z$ ou $\tau = (1+z)^\alpha - 1$, com $\alpha = 2\varepsilon$.

3.1 - Limite Independente do Modelo Cosmológico:

Usando a mesma RDDC modificada de [30] e [31], $d_L = d_A(1+z)^{2+\varepsilon}$, Holanda, Carvalho & Alcaniz (2014) [59], impuseram limites na opacidade cósmica, porém, de forma diferente de [31] que assumiram um modelo Λ CDM plano em suas análises. Os autores [59] testaram a transparência cósmica através de uma abordagem que não dependia de modelo cosmológico, onde foram usadas estimativas de d_L livres de opacidade, obtidas a partir de uma integração numérica das medidas recentes de dados de $H(z)$.

Os limites em ε foram feitas comparando estes dados de $H(z)$ com observações da amostra de 580 SNe Ia da Union 2.1 [60] com mais duas compilações do conjunto de dados SDSS + ESSENCE + SNLS + Telescópio Espacial Hubble [61], onde os autores discutiram a influência de diferentes curvas de luz das SNe Ia (calibração SALT2 e MLCS2K2) nos resultados.

Nesses dados, também foi acrescentado a mais distante SNe Ia confirmada espectroscopicamente (SNe Ia SCP-0401 $z = 1,713$) [62] com módulo de distância $45,57 \pm 0,24$.

3.1.2- Taxa de Expansão Cósmica $H(z)$:

O parâmetro de Hubble ($H = \frac{\dot{a}}{a}$), que mede a taxa de expansão do Universo, pode ser relacionado com quantidades de observáveis como a distância, o tempo e o *redshift* [63].

O tempo e o *redshift* cosmológico z estão relacionados pelo fator de escala:

$$1+z = \frac{a(t_0)}{a(t)}, \quad (3.6)$$

onde $z > 0$ em um Universo que se expande e $z \rightarrow \infty$ à medida que a época de emissão da luz tende ao Big Bang.

Medições recentes da taxa de expansão em $z \neq 0$ são obtidas calculando diretamente a derivada do *redshift* em relação ao tempo. Portanto, derivando a equação (3.6) em relação a t , considerando t_0 como uma constante, temos:

$$\frac{da(t)}{dt} = - \frac{a(t_0)}{(1+z)^2} \frac{dz}{dt} = - \frac{a(t)}{1+z} \frac{dz}{dt} \quad (3.7)$$

Dividindo ambos os lados da equação por $a(t)$, chegamos a:

$$H(z) = - \frac{1}{1+z} \frac{dz}{dt}, \quad (3.8)$$

onde $H(z)$ é o parâmetro de Hubble em função do *redshift*.

Esse método foi proposto por [64], pela primeira vez e tem por finalidade medir a diferença de idade entre duas galáxias vermelhas antigas com *redshifts* diferentes, a fim de obter a taxa $\frac{dz}{dt}$.

Mesmo que $H(z)$ não seja diretamente observável, ele pode, no entanto, ser deduzido de vários dados observacionais, tais como: *I*) Idades Cosmológicas (“relógios padrão”), ou *II*) Tamanhos Angulares (“régua padrão”)[65]. O primeiro método foi ilustrado por Jimenez & Loeb (2002) e leva ao OHD (Observational $H(z)$ Data) encontrado de diferentes idades de galáxias. Já o último método foi discutido por Blake & Glazebrook (2003) e Seo & Eisenstein (2005), que leva a $H(z)$ encontrado no pico de BAO.

As medidas de $H(z)$ podem ser feitas através das observações de galáxias que evoluem passivamente.

3.1.3 – Distâncias de Luminosidade através de dados $H(z)$:

Sabendo que medições recentes das taxas de expansão em $z \neq 0$ são obtidas calculando a derivada do tempo cósmico em relação ao *redshift*, dado pela equação (3.8). Os autores [59] utilizaram 28 dados de $H(z)$ (Simon et al. 2005, Gaztnaga et al. 2009, Stern et al. 2010 & Moresco et al. 2012, Blake et al. 2012, Zhang et al. 2012) e extraíram as estimativas de distâncias, nas quais se tornou necessário calcular a distância comóvel para dados espaçados de maneira não uniforme. Essa distância é dada por:

$$D_C = c \int_0^z \frac{dz'}{H(z')}$$

$$D_C \approx \frac{c}{2} \sum_{i=0}^N (z_{i+1} - z_i) \left[\frac{1}{H(z_i + 1)} + \frac{1}{H(z_i)} \right] \quad (3.9)$$

onde foi usada uma regra trapezoidal simples. Os autores consideraram a incerteza sobre os valores de $H(z)$, assumindo que o erro em medições de z é desprezível. Usando técnicas padrão de propagação de erros, o erro associado ao i -ésimo bin é dado por:

$$s_i = \frac{c}{2} (z_{i+1} - z_i) \left(\frac{\sigma_{H_{i+1}}^2}{H_{i+1}^4} + \frac{\sigma_{H_i}^2}{H_i^4} \right)^{1/2}, \quad (3.10)$$

onde o erro na integral (eq. 4.9) no intervalo $z = 0 - z_n$ é $\sigma_n^2 = \sum_{i=1}^N S_i$.

Para obter resultados mais consistentes, os autores adicionaram à amostra de $H(z)$ o valor $H_0 = 73,8 \pm 2,4$ km/s/Mpc, obtido por Riess et al. (2011)[66].

A figura 3 representa as medições das distâncias de luminosidade d_L obtidas através das observações de $H(z)$, assumindo $\Omega_k = 0$ (Universo plano). Para fins de comparação, foram também plotados medidas de D_L extraídas da amostra de SNe Ia Union 2.1 + SNe Ia SCP-0401. As $D_{L,true}$ são obtidas como segue:

$$\frac{D_{L,true}}{(1+z)} = \begin{cases} \frac{D_L}{\sqrt{\Omega_k}} \sinh \left[\sqrt{\Omega_k} \frac{D_C}{D_H} \right] & \text{para } \Omega_k > 0 \\ D_C & \text{para } \Omega_k = 0 \\ \frac{D_L}{\sqrt{\Omega_k}} \sin \left[\sqrt{\Omega_k} \frac{D_C}{D_H} \right] & \text{para } \Omega_k < 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

Assim como mostrado em [30] e [31], os autores [59] também assumiram uma função

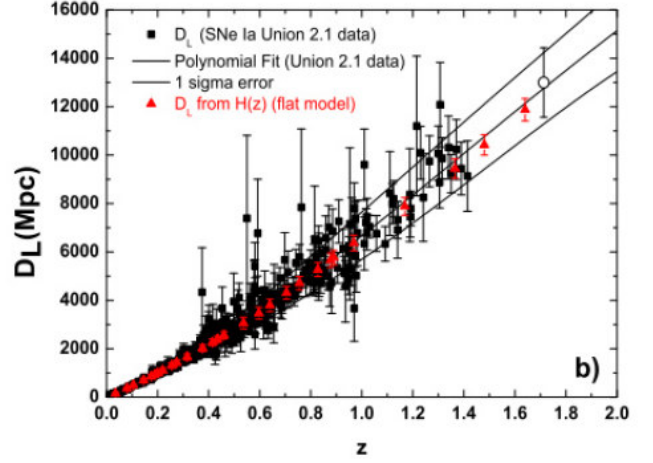


Figura 3: Os triângulos vermelhos preenchidos representam as distâncias de luminosidades obtidas a partir das medidas da taxa de expansão $H(z)$. Para fins de comparação, os autores de referência [59] adicionaram as medidas da Distância de Luminosidade obtidas da amostra de SNe Ia Union2.1 (quadrados pretos preenchidos). As curvas representam um ajuste polinomial dos pontos D_L livres de opacidade a partir de dados SNe Ia e o erro 1σ correspondente. O círculo aberto, à direita, corresponde à mais distante SNe Ia confirmada espectroscopicamente ($z = 1.713$). Figura retirada da referência[59].

para $\tau(z)$, considerando a relação $\tau(z) = 2\varepsilon|z|$. Com o intuito de se discutir os resultados em uma abordagem geral, [59] usaram geometrias de FLRW com curvatura arbitrária e adicionaram na análise o valor do parâmetro de curvatura dos dados do WMAP, ou seja, $\Omega_k = 0,0125 \pm 0,0155$ (2σ) [67].

4. Resultados e Discussão

Para analisar os resultados, os autores [59] utilizaram duas amostras de SNe Ia. A primeira delas, composta por dados de compilação da *Union* 2.1, usando o método SALT2 para calibrar as curvas de SNe Ia. Acrescentando-se nesta amostra, a supernova SCP-0401, a mais distante confirmada espectroscopicamente. Em seguida, esses resultados foram plotados no gráfico da Figura 3.

A segunda amostra consiste nos dados de 288 SNe Ia (SSDS + ESSENSE + SNLS + Telescópio Espacial Hubble), que para parametrizar as suas curvas de luz, foram utilizados os métodos SALT2 [68] e MLCS2K2 [69], distribuídas no intervalo de *redshift* $0,02 \leq z \leq 1,55$. Os autores [59] decidiram então, verificar o efeito do ajuste da curva de luz nos resultados e para suas análises, consideraram as sub-amostras SDSS. Nesse último, eles desprezaram duas medidas de $H(z)$ que não estavam dentro do intervalo de *redshift* mencionado acima: $H(z = 1,53) = 140 \pm 14$ e $H(z = 1,75) = 202 \pm 40$.

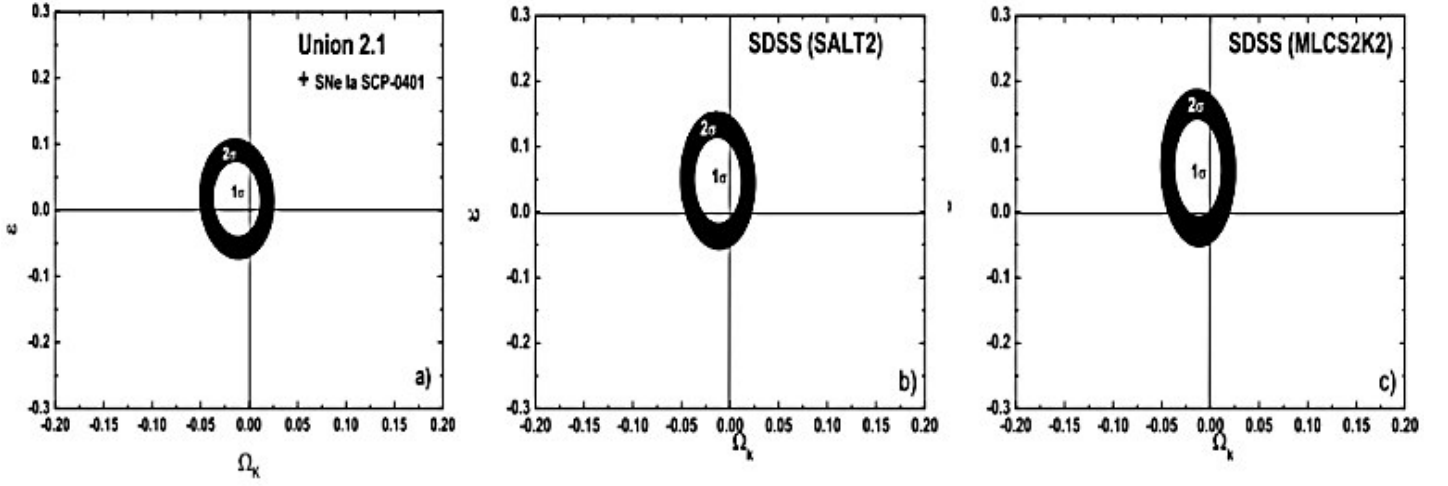


Figura 4: Os autores [59] discutiram contornos de confiança para os níveis 1σ e 2σ no plano $\Omega_k \times \epsilon$. Um Universo transparente ($\epsilon = 0$) e plano ($\Omega_k = 0$) é representado no ponto onde as duas linhas contínuas se cruzam. Figura retirada da referência[59].

A fim de estimar o melhor ajuste para o conjunto de parâmetros $P \equiv (\Omega_K, \epsilon, H_0)$, os autores avaliaram a função de distribuição (*Likelihood*), $\mathcal{L} \propto e^{-\chi^2/2}$, com:

$$\chi^2 = \sum_z \frac{(m_{obs}(z) - m_{true}(z) - 2.1715\epsilon z)^2}{\sigma_{m(obs)}^2 + \sigma_{m(true)}^2}, \quad (4.1)$$

em que $\sigma_{m(obs)}^2$ e $\sigma_{m(true)}^2$ são os erros associados aos módulos de distâncias de SNe Ia (sem erros sistemáticos) e aos módulos de distância extraídos das medições de $H(z)$, respectivamente. O módulo de distância real $m_{true}(z)$ é $m_{true} = 5 \log_{10} D_{L,true} + 25$, onde $D_{L,true}$ é dado pela equação (4.1).

Os gráficos da figura 4(a-c) são das compilações Union 2.1 + SNe Ia SCP-0401, SDDS (SALT2) e SDDS (MLCS2K2), onde mostram os contornos de $1\sigma, 2\sigma$ no plano $\Omega_k \times \epsilon$ nessas amostras, em cada um desses gráficos. Para a amostra Union 2.1 + SNe Ia SCP-0401, os autores [59] encontraram um Universo perfeitamente transparente ($\epsilon = 0$), já um Universo plano é permitido com $\epsilon = 0.017 \pm 0.055$, a um nível de 1σ . Uma análise nos gráficos 4b e 4c mostra a influência do ajuste da curva de luz, para fins de comparação. É possível notar que nenhum conflito significativo entre eles foi encontrado, com $\epsilon = 0.047 \pm 0.057$ (SALT2) e $\epsilon = 0.067 \pm 0.071$ (MLCS2K2) a 68,3 % de confiança estatística.

A probabilidade do parâmetro ϵ para Union2.1 + SNe Ia SCP-0401, SDDS (SALT2) e compilações SDDS(MLCS2K2) são mostrados na figura 5 após a marginalização sobre o parâmetro de curvatura Ω_k . Os autores [59] obtiveram, para este caso: $\epsilon = 0.017 \pm 0.052$, $\epsilon = 0.047 \pm 0.039$ e $\epsilon = 0.067 \pm 0.056$ em 1σ .

O que as análises dos autores [59] sugerem é que um Universo perfeitamente transparente ($\epsilon = 0$) e plano Ω_k está de acordo com a amostra Union 2.1 + SNe Ia SCP-0401, já as compilações SDDS são compatíveis com tal cenário num nível 2σ . Os autores [59] descobriram, nas margens de confiabilidade apresentadas, que um Universo completamente transparente está de acordo com a maior amostra (Union 2.1 + SNe Ia SCP-0401), após a marginalização sobre o parâmetro de curvatura Ω_k . Já para a amostra SDDS, um Universo completamente transparente é compatível a um nível $< 1.5\sigma$ de confiança estatística, independentemente das curvas de luz de SNe Ia.

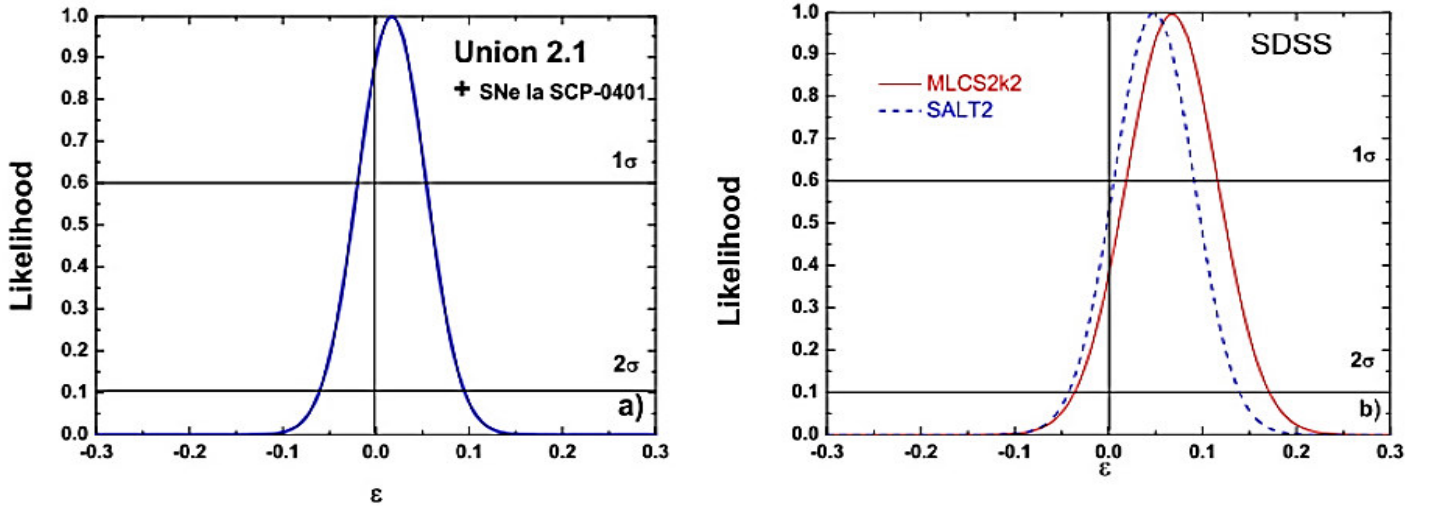


Figura 5: Likelihood para ϵ após a marginalização dos parâmetros de curvatura Ω_k e de Hubble $H(z)$. De acordo com a maior amostra SNe Ia pela análise de referência [59], (Union2.1 + SNe Ia SCP-0401) está completamente de acordo com um Universo transparente ($\epsilon = 0$). Figura retirada da referência[59].

5. Conclusões

Recentemente, diversos modelos cosmológicos foram testados, com o intuito de se descobrir a existência de alguma física exótica no Universo e que explique melhor o fenômeno da expansão cósmica. Para essa investigação, foram combinadas diversas medidas de distâncias de grandezas observáveis, como por exemplo: distâncias de luminosidades extraídas de SNe Ia e medições da taxa de expansão cósmica $H(z)$. Esse último tem sido uma excelente ferramenta, inclusive para impor limites sobre diversos parâmetros cosmológicos.

A presente monografia apresentou resultados de testes recentes do parâmetro de opacidade cósmica e possíveis desvios na “Transparência do Universo”, utilizando-se de dados de supernovas do tipo Ia, pelos autores de referência [59] e medidas de $H(z)$. Como sendo uma das hipóteses que mais sustentam a aceleração cósmica e também prevista pela métrica FLRW, essa transparência é baseada na conservação do número de fótons através de geodésicas nulas. Já no caso dos possíveis desvios na transparência cósmica, foram investigados de acordo com a relação de dualidade cósmica ou relação de Etherington, dada por $d_L(z) = (1+z)^2 d_A(z)$. Esse trabalho também apresentou um novo limite sobre o parâmetro de opacidade usando dados recentes de $H(z)$.

Limites foram impostos no parâmetro de opacidade cósmica ϵ , usando uma relação de Etherington modificada e assumindo um modelo Λ CDM padrão, [30] $(d_L(z) = d_A(1+z)^{2+\epsilon})$, e obtiveram os seguintes valores: com dados das supernovas: ($\epsilon = -0.08^{+0.21}_{-0.20}$) e já para o caso de SNe Ia & $H(z)$: ($\epsilon = -0.01^{+0.08}_{-0.09}$). Esses valores são compatíveis com um Universo transparente com 95 % de confiança.

Os autores de referência [31] atualizaram os limites sobre a opacidade cósmica usando a combinação de dados de SNe Ia com as últimas medições de $H(z)$ na faixa de *redshift* entre 0 e 2 para testar a existência de partículas exóticas que por sua vez apontam para uma nova Física além do modelo padrão, levando a uma fonte de opacidade cósmica. O novo limite em torno do parâmetro de opacidade foi $\epsilon = -0.04^{+0.08}_{-0.07}$ a 95 % de confiança estatística.

Quanto aos autores de referência [59], impuseram limites na opacidade cósmica independente de modelo cosmológico, e obtiveram $\epsilon = 0,017 \pm 0,052$ (obtido através da amostra Union 2.1 + SNe Ia SCP-0401, após a marginalização), estando completamente de acordo com um Universo perfeitamente transparente e um Universo plano (Ω_k) a um nível 1σ . Para uma amostra SDSS, tal Universo é compatível a um nível 1.5σ independentemente do ajuste da curva de luz utilizado nos dados de supernova Ia.

6. Bibliografia

- [1] EINSTEIN, A. Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. Annalen der Physik, 49: 769?822, 1916.
- [2] EINSTEIN, A. Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie. Sitzungsberichte der Königlich PreuBischen Akademie der Wissenschaften (Berlin), Seite 142-152., 1917, pp 142-152.
- [3] DE SITTER, W., Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences. Third paper. MNRAS, 91, 483, 1917.
- [4] FRIEDMANN, A. Über die Krümmung des Raumes, Zeitschrift für Physik A, 10 (1): 377?386, 1922.
- [5] FRIEDMANN, A. Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes, Zeitschrift für Physik A, 21 (1): 326?332, 1924.
- [6] HUBBLE, E. P., A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. Proceedings of the National Academy, 1929, p. 168-173.
- [7] ALPHER, R. A., HERMAN, R., GAMOW, G. A., Thermonuclear Reactions in the Expanding Universe. Physical Review, 1948, vol. 74, p. 1198.
- [8] PENZIAS, A. A., WILSON, R. W., A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s . The Astrophysical Journal, v.142, 1965.
- [9] Riess, A. G. et al., 1998, Astronomical J., 116, 1009 Perlmutter, S. J. et al., 1998, Nature, 391,51
- [10] Chen, W. e Wu, Y-S.,1990, Phys. Rev. D, 41, 695
- [11] Carvalho, J. C.; Lima, J.A.S. e Waga, I., 1992, Phys. Rev. D, 46, 2404
- [12] Abdel-Rahman, A.-M. M., 1992, Phys. Rev. D, 45, 3497 Waga, I., 1993, ApJ, 414, 436 Maia, J. M. F. e Lima, J.A.S., 1993, Mod. Phys. Lett. A, 8, 591 Beesham, A., 1993, Phys. Rev., D48, 3539 Lima, J. A.S. e Maia, J.M.F., 1994, Phys. Rev.D, 49, 5597 Arbab, A. I. e Abdel-Rahman, A.M.M., 1994, Phys. Rev. D, 50, 7725 Matygasek, J., 1994, Phys. Rev. D, 51, 4154
- [13] Lima, J.A.S. e Alcaniz, J.S.,2004, PLB, 600, 191
- [14] Lima, J.A.S., 2004, Braz. J. Phys. 34, 194
- [15] Kamenshchik, A.; Moschella, U. e Pasquier, V., 2001, Phys. Lett. B, 511, 265
- [16] Bilic, N.; Tupper, G. B. e Violler, R.D., 2002, Phys lett., B, 535, 17
- [17] Bento, M. C.; Bertolami, O. e Sen, A. A., 2002, Phys. Rev. D, 66, 043507
- [18] Fabris, J. C.;Gonçalves, S.V.B. e de Souza, P. E., astro-ph/0207430
- [19] Friedmann, A., 1922, Zeitschrift für Physik 10, 377; 1924, Zeitschrift für Physik 21, 326
- [20] LEMAÎTRE, G. Un Univers homogene de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nebuleuses extragalactiques [A homogeneous universe of constant mass and increasing radius accounting for the radial velocity of extra-galactic nebulae]. Ann Soc Scientifique Bruxelles 47:49?59. French, 1927.
- [21] ROBERTSON, H. P. Kinematics and world structure, Astrophysical Journal, 82: 284?301, 1935.
- [22] WALKER, A. G. On Milne's theory of world-structure, Proceedings of the London Mathematical Society 2, 42 (1): 90?127, 1937.
- [23] DRELL, P. S.; LOREDO, T. J.; WASSERMAN, I. Type Ia supernovae, evolution, and the cosmological constant. The Astrophysical Journal, v. 530, n. 2, p. 593, 2000.
- [24] COMBES, F. Properties of SN-host galaxies. New Astronomy Reviews, v. 48, n. 7, p. 583-589, 2004.
- [25] ISHAK, M.; UPADHYE, A.; SPERGEL, D. N. Probing cosmic acceleration beyond the equation of state: Distinguishing between dark energy and modified gravity models. Physical Review D, v. 74, n. 4, p. 043513, 2006.
- [26] KUNZ, M.; SAPONE, D. Dark energy versus modified gravity. Physical review letters, v. 98, n. 12, p. 121301, 2007.
- [27] BERTSCHINGER, E.; ZUKIN, P. Distinguishing modified gravity from dark energy. Physical Review D, v. 78, n. 2, p. 024015, 2008.
- [28] ZEHAVID, Idit et al. A local Hubble bubble from type Ia supernovae?. The Astrophysical Journal, v. 503, n. 2, p. 483, 1998.
- [29] CONLEY, A. et al. Is there evidence for a Hubble bubble? The nature of type Ia supernova colors and dust in external galaxies. The Astrophysical Journal Letters, v. 664, n. 1, p. L13, 2007.
- [30] AVGOUSTIDIS, A., VERDE, L.,JIMENEZ, R. Consistency among distance measurements: transparency, BAO scale and accelerated expansion. arXiv:0902.2006, 2009.

- [31] AVGOUSTIDIS, A., et al. Constraints on cosmic opacity and beyond the standard model physics from cosmological distance measurements. arXiv:1004.2053, 2010.
- [32] AGUIRRE, A. Intergalactic dust and observations of type ia supernovae. The Astrophysical Journal, v. 525, n. 2, p. 583, 1999.
- [33] ROWAN-ROBINSON, M. Do Type Ia supernovae prove $\Lambda > 0$?. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 332, n. 2, p. 352-360, 2002.
- [34] ETHERINGTON, I. M. H. On the definition of distance in general relativity. Philosophical Magazine, vol 15, p. 761, 1933 (Reimpresso em Gen. Rel. Grav. 39 (2007) 1055).
- [35] AVGOUSTIDIS, A., VERDE, L., JIMENEZ, R. Consistency among distance measurements: transparency, BAO scale and accelerated expansion. arXiv:0902.2006, 2009.
- [36] VALKENBURG, W.; MARRA, V.; CLARKSON, C. Testing the Copernican principle by constraining spatial homogeneity. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, v. 438, n. 1, p. L6-L10, 2013.
- [37] PANDEY, B.; SARKAR, S. Testing homogeneity in the Sloan Digital Sky Survey Data Release Twelve with Shannon entropy. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 454, n. 3, p. 2647-2656, 2015.
- [38] CARMELI, M., Classical Fields: General Relativity and Gauge Theory. New York: John Wiley & Sons, 1982.
- [39] LIDDLE, A. R. An Introduction To Modern Cosmology. Ed. John Wiley. 2003.
- [40] WEINBERG, S., Cosmology. New York: Oxford University Press Inc., 2008. 593p.
- [41] HOBSON, M. P.; EFSTATHIOU, G. P.; LASENBY, A. N., General Relativity: An Introduction for Physicists. Cambridge University Press, 2006. 592p.
- [42] ELLIS, G. F. R., Gen. Relativ. Gravit , 39, 1047, 2007.
- [43] LIAO, K., AVGOUSTIDIS, A., LI, Z. Testing cosmic opacity from SNe Ia and Hubble parameter through three cosmological-model-independent methods arXiv:1212.6612v1, 2012.
- [44] LI, Z., WU, P., YU, H. Cosmological-model-independent tests for the distance-duality relation from Galaxy Clusters and Type Ia Supernova. [arXiv:1104.2497 [astro-ph.CO]], 2011.
- [45] HOLANDA, R. F. L., IILMA, J. A. S., RIBEIRO, M.B., Testing the Distance-Duality Relation With Galaxy Clusters and Type Ia Supernovae. ApJ, 722. L233. 2010.
- [46] NAIR, R., JHINGAN, S., JAIN, D. An Improved Method for test the Distance-Duality Relation. J. Cosmol. Astropart. Phys. 05, 023 (2011).
- [47] GONCALVES, R. S., HOLANDA, R. F. L., ALCANIZ, J. S. Testing the cosmic distance duality with X-ray gas mass fraction and supernovae data. arXiv:1109.2790 [astro-ph.CO], 2010.
- [48] MORAIS, A. M. A. Supernovas e Cosmologia. São Paulo. Editora Livraria da Física, 2009.
- [49] XIANGCUNETA, M., GAO, Y., HAN, Z. SNe Ia as a cosmological probe. arXiv:1510.02507v1.
- [50] COSTA, F. S. M. Um estudo introdutório sobre as estrelas. 2014. 75f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) - UEPB, Campina Grande, 2014.
- [51] NUGENT, P. E., SULLIVAN, M., CENKO, S. B., et al. Supernova SN 2011fe from an exploding carbon-oxygen white dwarf star. Nature, 480, 344, 2011.
- [52] LEIBUNDGUT, B.; et al. A cosmological surprise: The universe accelerates. The Astrophysical Journal. 32 (4): 121, 2003.
- [53] RIESS, A. G., FILIPPENKO, A. V., CHALLIS, P., CLOCCHIATTI, A., DIERCKS, A., et al. P. M. G., Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. AJ, 1998, vol. 116, p. 1009.
- [54] CALDWELL, R. R.; KAMIONKOWSKI, M. The physics of cosmic acceleration. Annual Review of Nuclear and Particle Science, v. 59, p. 397-429, 2009.
- [55] LIMA, J. A. S., ALCANIZ, J. S.; Flat Friedmann-Robertson-Walker cosmologies with adiabatic matter creation: kinematic tests. Astronomy and Astrophysics, v.348, p.1-7, 1999.
- [56] CHIMENTO, L. P.; JAKUBI, Alejandro S.; PAVON, D.. Dark energy, dissipation, and the coincidence problem. Physical Review D, v. 67, n. 8, p. 087302, 2003
- [57] KOWALSKI, M., et al. Improved Cosmological Constraints from New, Old and Combined Supernova Datasets. ApJ, 686, 749, 2008
- [58] SIMON, J.; VERDE, L.; JIMENEZ, R. Constraints on the redshift dependence of the dark energy potential. Physical Review D, v. 71, n. 12, p. 123001, 2005.

- [59] HOLANDA, R. F. L., CARVALHO, J. C.,
ALCANIZ, J. S. Model-independent
constraints on the cosmic
opacity. arXiv:1207.1694v3, 2014.
- [60] SUZUKI, N. et al. The Hubble Space Telescope
Cluster Supernova Survey. V. Improving the
dark-energy constraints above $z > 1$ and
building an early-type-hosted supernova
sample. The Astrophysical Journal, v. 746, n.
1, p. 85, 2012.
- [61] KESSLER, Richard et al. First-year Sloan
Digital Sky Survey-II supernova results:
Hubble diagram and cosmological parameters.
The Astrophysical Journal Supplement
Series, v. 185, n. 1, p. 32, 2009.
- [62] RUBIN, D. et al. Precision measurement of
the most distant spectroscopically confirmed
supernova Ia with the Hubble Space
Telescope. The Astrophysical Journal, v.
763, n. 1, p. 35, 2013.
- [63] ZHANG, T-J; MA, C.; LAN, T. Constraints on
the dark side of the universe and
observational Hubble parameter data.
Advances in Astronomy, v. 2010, 2011.
- [64] JIMENEZ, Raul; LOEB, Abraham.
Constraining cosmological parameters based
on relative galaxy ages. The Astrophysical
Journal, v. 573, n. 1, p. 37, 2002.
- [65] MA, C.; ZHANG, T-J. Power of observational
Hubble parameter data: a figure of merit
exploration. The Astrophysical Journal, v.
730, n. 2, p. 74, 2011.
- [66] RIESS, A. G. et al. A 3% solution:
determination of the Hubble constant with the
Hubble Space Telescope and Wide Field
Camera 3. The Astrophysical Journal, v. 730,
n. 2, p. 119, 2011.
- [67] KOMATSU, E. et al. Seven-year wilkinson
microwave anisotropy probe (WMAP*)
observations: cosmological
interpretation. The Astrophysical Journal
Supplement Series, v. 192, n. 2, p. 18, 2011.
- [68] GUY, J. et al. SALT2: using distant
supernovae to improve the use of type Ia
supernovae as distance indicators. Astronomy
& Astrophysics, v. 466, n. 1,
p. 11-21, 2007.
- [69] JHA, S.; RIESS, A. G.; KIRSHNER, R. P.
Improved distances to type Ia supernovae
with multicolor light- curve shapes:
MLCS2k2. The Astrophysical Journal, v.
659, n. 1, p. 122, 2007.